疏勒河干流降水变化特征①

孙栋元[1,2]， 齐广平[1]， 鄢继选[1]， 安鹏存[1]
（1. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省水利科学研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：选取疏勒河干流3个水文站1956—2016年逐月、逐年降水数据作为基础资料，采用线性倾向、累积距平、滑动平均、Mann-Kendall突变检验等方法，分析疏勒河干流降水量年变化、年内变化、年代际变化、季节变化和突变特征。结果表明：疏勒河干流年降水量呈现不同程度增加趋势，年降水量倾向率排序表现为：昌马堡站5.47 mm·$(10a)^{-1}$ > 双塔堡水库站1.454 mm·$(10a)^{-1}$ > 潘家庄站0.866 mm·$(10a)^{-1}$；降水量年内分配极不均匀，主要集中于5—8月，占年降水量的65%以上；降水量年代际呈现20世纪60年代和90年代降水量均低于多年平均值，20世纪70年代和21世纪10年代降水量均高于多年平均值；降水量季节变化不同站点呈现不同变化特征，昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站分别是夏季、秋季和秋季降水对降水量贡献最大，同时不同季节不同年代平均降水量距平呈现不同变化特征；降水量突变年在不同季节呈现不同突变特征和不同突变时间，昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站年平均降水量突变点分别为1964年和2001年、1988年和1987年。

关键词：疏勒河干流；降水量；变化特征；Mann-Kendall检验法；甘肃

降水作为水文循环的重要环节，是决定区域水资源量时空分布特征最重要的因素，也是区域自然地理特征重要表征要素与关键环节[1-5]。降水量变化特征研究为气候变化、水文预报、区域水资源分布提供了重要依据，不仅直接影响着区域地表及地下水量，乃至全球的水分平衡，还影响着区域干旱、洪涝等自然灾害的形成以及自然生态环境、社会经济活动和农业生产等方面[4-12]。因此，研究区域降水量变化特征，掌握区域水文气候演变规律，从而为区域水资源综合管理与科学配置提供重要参考和借鉴依据。尽管不同学者针对降水从不同区域、不同时间尺度等方面开展了大量的研究工作[1-21]，取得了许多成果。但由于受地域性、区域性和下垫面因素影响，不同区域降水呈现其独有的变化特性，尤其是干旱内陆河流域，由于其独特地理环境和水文气象特征，其降水量变化特征深刻影响着区域气象过程和水文过程，加之气候变化和强烈的人类活动影响，降水量在区域呈现不同的演变规律和变化态势。目前，针对干旱内陆河流域降水变化方面的研究仍然相对欠缺，特别是有关疏勒河流域降水方面的研究。常继青、张丽、宋阁庆、李清峰、余波和赵玮等对疏勒河流域降水径流变化特性、降水分布规律、空间分布规律、降水水化学分布、大气降水同位素特征和上游高寒草地生长季降水特征等方面进行了研究[22-27]。因此，针对疏勒河流域特殊地理位置和气候状况，开展流域干流降水变化规律研究，探究区域降水变化的差异性，从而为指导区域水资源综合管理、促进社会经济发展、保护生态环境等方面提供基础依据与技术支撑。本文选取疏勒河流域干流昌马堡（1956—2016年）、潘家庄（1959—2016年）和双塔堡水库（1960—2016年）3个水文站长系列降水资料作为基础数据，采用线性倾向、累积距平、滑动平均、Mann-Kendall突变检验等方法，对疏勒河流域干流降水变化序列进行研究，分析其降水年变化、年内变化、年代际变化、季节变化、突变时间等变化特征，探索流域降水变化规律与差异性，旨在为流域水资源综合利用、环境保护、气候灾害防治等方面提供科学依据，更为干旱区气候变化研究提供补充和参考。

① **收稿日期：**2019-05-10； **修订日期：**2019-09-03
基金项目：清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金（sklhse-2018-A-05）；甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目（甘水科外发〔2018〕70号-3和甘水科外发〔2017〕76号-10）；农业工程培育学科建设开放基金（XP201806-2）
作者简介：孙栋元（1978-），男，博士，教授级高级工程师，研究方向为水文水资源与干旱区水土资源. E-mail：gsausundy@126.com
通讯作者：齐广平. E-mail：qigp@gsau.edu.cn

1 研究区概况

疏勒河流域作为甘肃省 3 大内陆河流域之一。地理位置 92°11′~98°30′E,38°00′~42°48′N,干流全长 670 km,流域面积 4.13×10^4 km^2[28]。流域多年平均气温 6.98~9.82 ℃,年降水量 40.2~57.5 mm,年蒸发量 2 577.4~2 653.2 mm,降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 61%[29]。研究区示意图(图 1)。

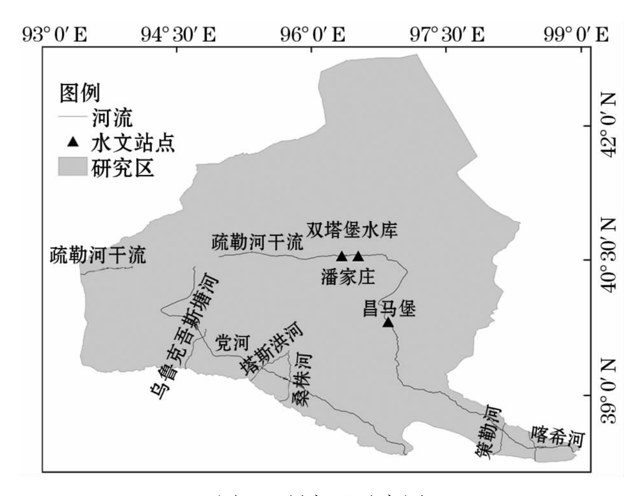


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2 资料与方法

2.1 资料来源与处理

选取疏勒河流域干流昌马堡(1956—2016 年)、潘家庄(1959—2016 年)和双塔堡水库(1960—2016 年)3 个水文站逐月、逐年降水数据作为基础资料,所有数据来源于甘肃省水文水资源局。通过各站点降水数据进一步研究其降水变化特征。根据数据资料,年代际划分为:1956—1959 年为 50 年代,1960—1969 年为 60 年代,1970—1979 年为 70 年代,1980—1989 年为 80 年代,1990—1999 年为 90 年代,2000—2009 年为 00 年代,2010—2016 年为 10 年代。季节划分:3—5 月春季,6—8 月夏季,9—11 月秋季,12—2 月冬季。

2.2 研究方法

通过线性倾向拟合法来描述其线性变化趋势与倾向率[30-34]。采用滑动平均法的滑动平均曲线图来判断其变化波动呈上升或下降趋势[30]。累积距平法是一种通过曲线直观判断变化趋势的方法,同时可利用累积最大绝对值判断出突变发生大致时间[30-33]。Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法,能够很好地对变量进行突变检验和变化趋势分析,已广泛应用于气温、降水、径流等水文和气象要素的分析[31-35]。

3 结果与分析

3.1 降水年变化特征

疏勒河干流昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站多年平均降水量分别为 95.77 mm、51.39 mm 和 52.52 mm。昌马堡站年降水量最大值为 2007 年的 184.60 mm,最小值为 1956 年的 35.4 mm,相差 149.2 mm,极值比为 5.21。潘家庄站最大值为 1979 年的 146.8 mm,最小值为 1982 年的 22.3 mm,相差 124.5 mm,极值比为 6.58。双塔堡水库站最大值为 1979 年的 141.1 mm,最小值为 1960 年的 17.6 mm,相差 123.5 mm,极值比为 8.02。由图 2a、2b 和 2c 可知,昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站降水呈现不同程度增加趋势,线性倾向方程分别为 $y=0.547x+78.809$、$y=0.0866x+48.835$ 和 $y=0.1454x+48.3$,年均降水量分别以 5.47 mm·$(10a)^{-1}$、0.866 mm·$(10a)^{-1}$ 和 1.454 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加,61 a、58 a 和 57 a 内分别增加了 33.37 mm、5.02 mm 和 8.29 mm,通过显著性检验,表明 3 站变化趋势均不显著。同时,从 3 个站年均降水量变化 5 a 滑动平均曲线(图 2a、2b 和 2c)可以看出,年均降水量均呈现缓慢增加—减小—增加波动变化趋势,呈现多段上升—下降—上升变化过程。由图 2d 累积距平可知,3 个站降水量均呈现 4 个时段升降变化过程,昌马堡站 1956—1972 年和 1985—2001 年呈现下降趋势,1973—1984 年和 2002—2016 年呈现上升趋势;潘家庄站 1956—1970 年和 1985—2011 年呈现下降趋势,1971—1984 年和 2012—2016 年呈现上升趋势;双塔堡水库站年 1960—1970 年和 1985—2011 年呈现下降趋势,1972—1984 年和 2012—2016 年呈现上升趋势。

总体上,疏勒河干流年降水量呈现不同程度增加趋势,年降水量倾向率排序表现为昌马堡站[5.47 mm·$(10a)^{-1}$]>双塔堡水库站[1.454 mm·$(10a)^{-1}$]>潘家庄站[0.866 mm·$(10a)^{-1}$]。

3.2 降水年内变化特征

由图 3 可知,干流降水量年内分配极不均匀,降水量主要集中于 5—8 月,昌马堡站分别占年降水量

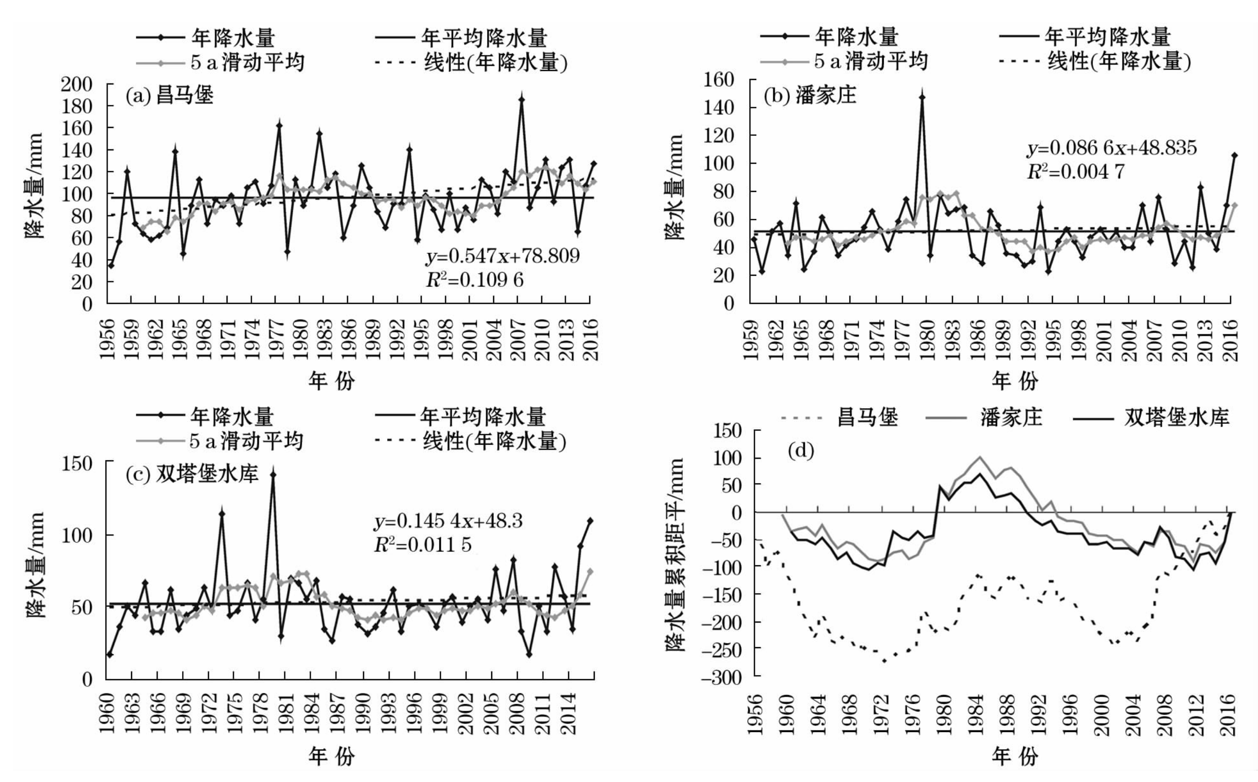


图 2 疏勒河干流年降水量和降水量累积距平变化

Fig. 2 Change of annual precipitation and precipitation cumulative anomaly of mainstream in Shule River

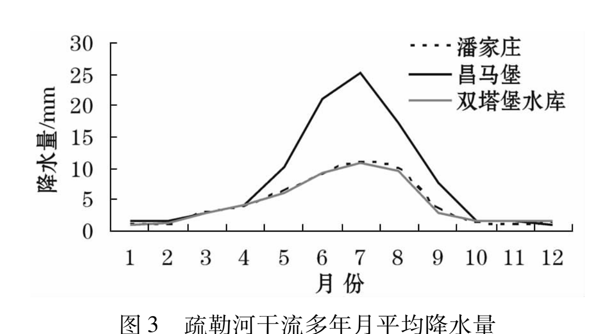


图 3 疏勒河干流多年月平均降水量

Fig. 3 Average monthly precipitation over many years of mainstream in Shule River

的 12.19%、17.33%、21.25% 和 18.99%,共占年降水量的 69.76%;潘家庄站分别为 10.51%、21.84%、26.45% 和 18.15%,共占 76.95%;双塔堡水库站分别为 11.41%、17.57%、20.40% 和 18.47%,共占 67.85%。总体上,疏勒河干流降水量主要集中于 5—8 月,占年降水量的 65% 以上。

3.3 降水年代际变化特征

由表 1 可知,过去 61 a 昌马堡站 50—60 年代和 90 年代降水量相对较低,比多年平均值分别低 24.87 mm、15.1 mm 和 8.86 mm;70—80 年代和 00—10 年代降水量相对较高,分别高 3.99 mm、7.75 mm、11.48 mm 和 15.23 mm,同时各个时段降水量呈现不同极值变化特征。

表 1 疏勒河干流昌马堡站年代际降水量特征值

Tab. 1 Characteristic values of annual precipitation of Changmabao of mainstream in Shule River Basin

时段	平均值 /mm	最大值 /mm	年份	最小值 /mm	年份	极值比
1956—1959	70.90	119.2	1958	35.40	1956	3.37
1960—1969	80.67	138.2	1964	45.10	1965	3.06
1970—1979	99.76	162.0	1977	47.10	1978	3.44
1980—1989	103.52	154.1	1982	60.50	1985	2.55
1990—1999	86.91	140.4	1993	57.30	1994	2.45
2000—2009	107.25	184.6	2007	76.60	2001	2.41
2010—2016	111.00	131.3	2010	64.80	2014	2.03
1956—2016	95.77	184.6	2007	35.40	1956	5.21

由表 2 可知,过去 58 a 潘家庄站 60 年代、90—00 年代降水量相对较低,比多年平均值分别低 6.94 mm、10.86 mm 和 1.43 mm;70—80 年代和 21 世纪 10 年代降水量相对较高,分别高 12.26 mm、1.79 mm 和 8.38 mm,同时各个时段降水量呈现不同极值变化特征。

由表 3 可知,过去 57 a 双塔堡水库站 60 年代、80 年代至 21 世纪 00 年代降水量相对较低,比多年平均值分别低 10.25 mm、2.61 mm、7.63 mm 和 2.57 mm;70年代和21世纪10年代降水量相对较高,分别

表 2 疏勒河干流潘家庄站年代际降水量特征值

Tab. 2 Characteristic values of annual precipitation of Panjiazhuang of mainstream in Shule River Basin

时段	平均值/mm	最大值/mm	年份	最小值/mm	年份	极值比
1959—1969	44.45	71.9	1964	22.5	1960	3.20
1970—1979	63.65	146.8	1979	39.0	1975	3.76
1980—1989	53.18	77.1	1981	28.8	1986	2.68
1990—1999	40.53	68.5	1993	22.3	1994	3.07
2000—2009	49.96	75.9	2007	28.4	2009	2.67
2010—2016	59.77	106.2	2016	25.3	2011	4.20
1959—2016	51.39	146.8	1979	22.3	1982	6.58

表 3 疏勒河流域双塔堡水库站年代际降水量特征值

Tab. 3 Characteristic values of annual precipitation of Shuangtabao reservoir of mainstream in Shule River Basin

时段	平均值/mm	最大值/mm	年份	最小值/mm	年份	极值比
1960—1969	42.27	66.6	1964	17.6	1960	3.78
1970—1979	67.15	141.1	1979	41.6	1977	3.39
1980—1989	49.91	69.6	1981	27.1	1986	2.57
1990—1999	44.89	61.4	1993	31.9	1990	1.92
2000—2009	49.95	82.8	2007	18.1	2009	4.57
2010—2016	64.53	108.7	2016	33.9	2011	3.21
1960—2016	52.52	141.1	1979	17.6	1960	8.02

高14.63 mm和12.01 mm，同时各个时段降水量呈现不同极值变化特征。

总体上，疏勒河干流降水量年代际呈现20世纪60年代和90年代降水量均低于多年平均值，70年代和21世纪10年代降水量均高于多年平均值。

3.4 降水季节变化特征

3.4.1 昌马堡站 由图4和表4可知，昌马堡站春、夏、秋、冬4个季节年降水量均呈现增加趋势，但各个季节增加速率略有差异。夏季增加速率最高，1956—2016年增加14.15 mm，线性增加幅度2.139 mm·$(10a)^{-1}$；秋季和春季次之，分别增加9.99 mm和9.84 mm，增加幅度分别为1.637 mm·$(10a)^{-1}$和1.613 mm·$(10a)^{-1}$；冬季增加最小为0.49 mm，增加幅度0.081 mm·$(10a)^{-1}$，表明该站夏季降水量增加对年降水量增加贡献最大。

由表4可知，① 春季：平均年降水量距平值50—70年代和90年代为负，80年代和21世纪00—10年代为正，50年代最少，比年均少6.13 mm；80年代最多，比年均多5.26 mm。② 夏季：50—60年代和90—00年代为负，70—80年代和21世纪10年代为正，60年代最少，比年均少10.60 mm；10年代最多，比年均多12.66 mm。③ 秋季：50—60年代和80—90年代为负，70年代和21世纪00—10年代为

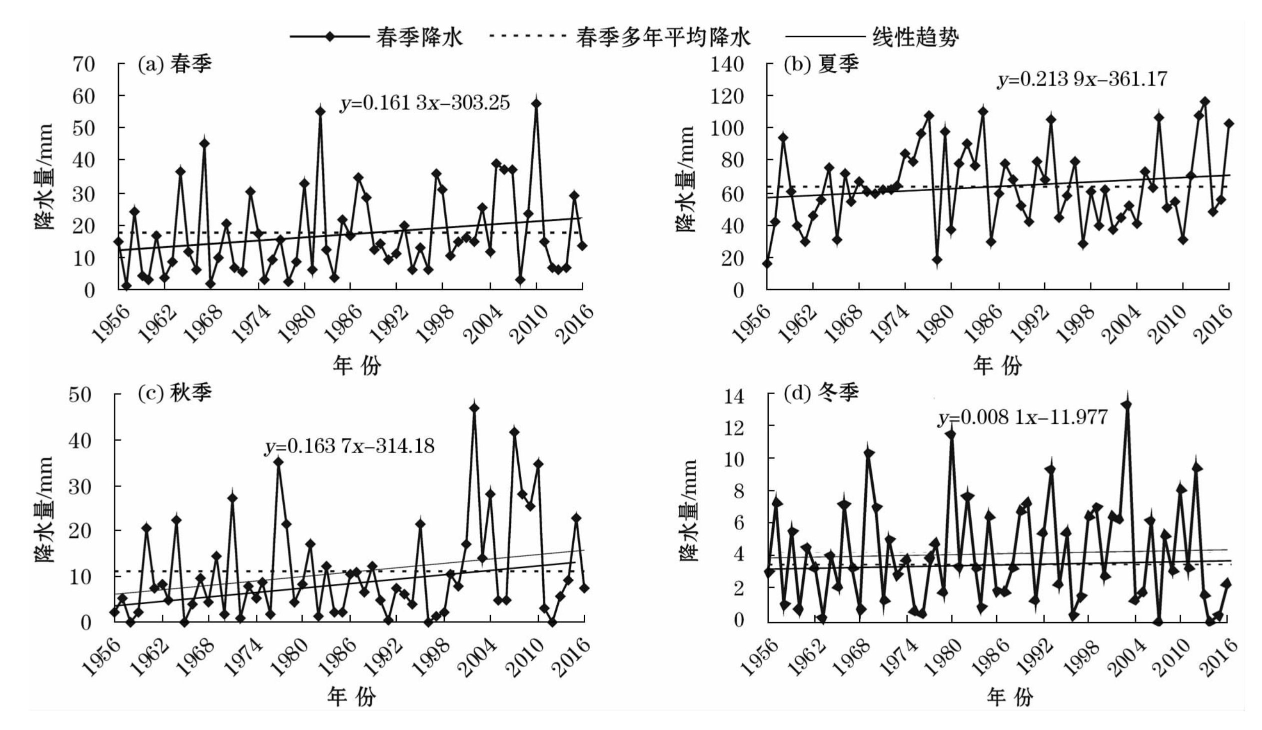


图4 昌马堡站降水量季节变化

Fig. 4 Seasonal change of precipitation in Changmabao Station

表 4　疏勒河干流降水季节距平变化

Tab. 4　Seasonal anomaly variation of precipitation in of mainstream in Shule River mm

年代	春季			夏季			秋季			冬季		
	昌马堡	潘家庄	双塔堡水库	昌马堡	潘家庄	双塔堡水库	昌马堡	潘家庄	双塔堡水库	昌马堡	潘家庄	双塔堡水库
50 年代	-6.13			-10.39			-8.48			0.13		
60 年代	-2.74	2.80	2.05	-10.60	-6.58	-9.25	-1.31	-3.29	-3.11	-0.45	0.14	0.06
70 年代	-5.24	-0.97	2.27	9.66	10.37	10.10	0.51	2.87	2.02	-0.94	-0.01	0.24
80 年代	5.26	-0.18	-1.39	4.37	4.69	1.70	-2.47	-2.92	-2.73	0.59	0.20	-0.19
90 年代	-1.47	-3.79	-5.29	-2.93	-4.67	-0.25	-5.02	-1.58	-0.76	0.56	-0.82	-1.33
00 年代	5.15	0.85	0.74	-5.21	-7.81	-8.20	10.99	4.61	3.72	0.55	0.92	1.17
10 年代	2.13	1.47	2.28	12.66	6.65	8.44	0.95	0.89	1.24	-0.51	-0.63	0.05

正,50 年代最少,比年均少 8.48 mm;00 年代最多,比年均多 10.99 mm。④ 冬季:60—70 年代和 10 年代为负,50 年代和 80—00 年代为正,70 年代最少,比年均少 0.94 mm;80 年代最多,比年均多 0.59 mm。

3.4.2　潘家庄站　由图 5 和表 4 可知,潘家庄站夏、秋、冬 3 个季节年降水量均表现出略微增加趋势,而春季表现出略微减小趋势。秋季增加速率相对最高,1959—2016 年增加 5.20 mm,线性增加幅度 0.897 mm·$(10a)^{-1}$;夏季和冬季分别增加 0.81 mm 和0.10 mm,增加幅度分别为 0.139 mm·$(10a)^{-1}$和 0.017 mm·$(10a)^{-1}$;春季减小 1.08 mm,减小幅度 -0.187 mm·$(10a)^{-1}$,表明该站秋季降水量增加对年降水量增加贡献最大。

由表 4 可知,① 春季:平均降水量距平值 70—90 年代为负,60 年代和 00—10 年代为正,90 年代最少,比年均少 3.79 mm;60 年代最多,比年均多 2.80 mm。② 夏季:50 年代、90—00 年代为负,70—80 年代和 10 年代为正,00 年代最少,比年均少 7.81 mm;70 年代最多,比年均多 10.37 mm。③ 秋季:60 年代和 80—90 年代为负,70 年代和 00—10 年代为正,60 年代最少,比年均少 3.29 mm;00 年代最多,比年均多 4.61 mm。④ 冬季:70 年代、90 年代和 10 年代为负,60 年代、80 年代和 00 年代为正,

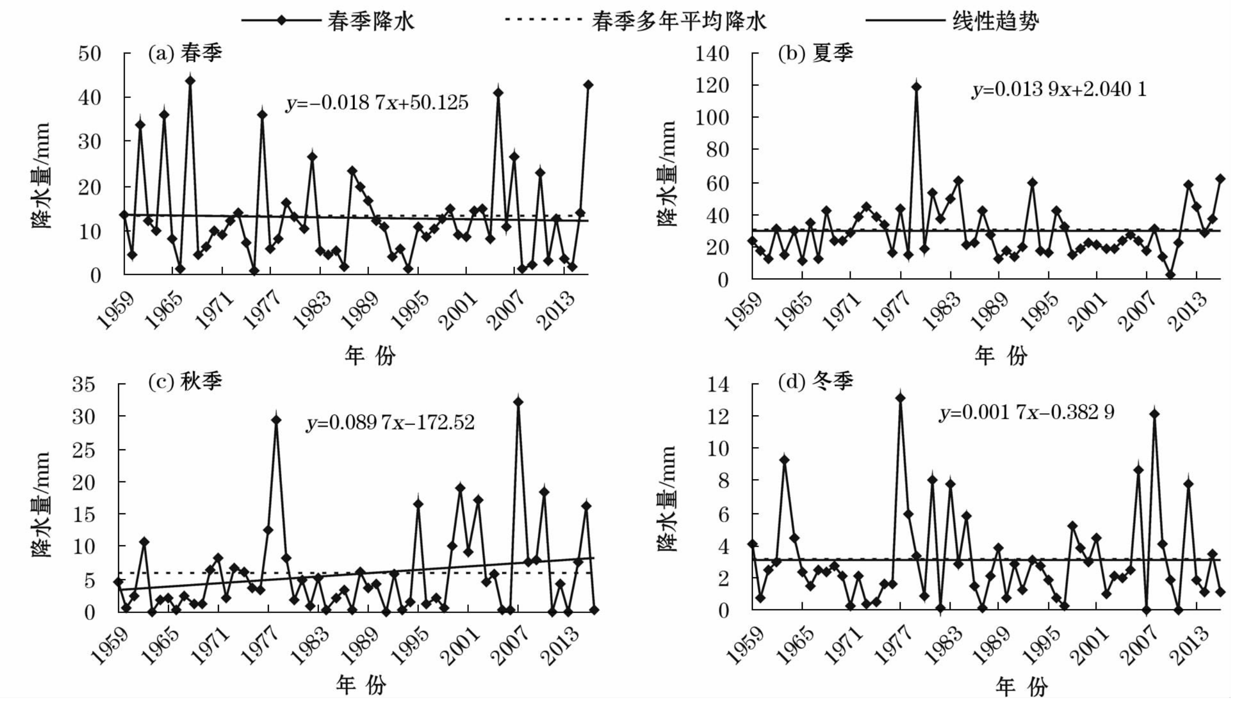


图 5　潘家庄站降水量季节变化

Fig. 5　Seasonal change of precipitation in Panjiazhuang Station

90 年代最少，比年均少 0.82 mm；00 年代最多，比年均多 0.92 mm。

3.4.3　双塔堡水库站　由图 6 和表 4 可知，双塔堡水库站夏、秋、冬 3 个季节年降水量均表现出略微增加趋势，而春季表现出略微减小趋势。秋季增加速率相对最高，1960—2016 年增加 5.27 mm，线性增加幅度 0.925 mm·$(10a)^{-1}$；夏季和冬季分别增加 4.27 mm 和 0.37 mm，增加幅度分别为 0.749 mm·$(10a)^{-1}$ 和 0.065 mm·$(10a)^{-1}$；春季减小 1.62 mm，减小幅度 -0.285 mm·$(10a)^{-1}$，表明该站秋季降水量增加对年降水量增加贡献最大。

由表 4 可知，① 春季：平均降水量距平值 80—90 年代为负，60—70 年代和 00—10 年代为正，90 年代平均降水量最少，比年均少 5.29 mm；01 年代最多，比年均多 2.28 mm。② 夏季：60 年代和 90—00 年代为负，70—80 年代和 10 年代为正，60 年代最少，比年均少 9.25 mm；10 年代最多，比年均多 8.44 mm。③ 秋季：60 年代和 80—90 年代为负，70 年代和 00—10 年代为正，60 年代最少，比年均少 3.11 mm；00 年代最多，比年均多 3.72 mm。④ 冬季：80—90 年代为负，60—70 年代和 00—10 年代为正，90 年代最少，比年均少 1.33 mm；00 年代最多，比年均多 1.17 mm。

总体上，疏勒河干流降水量季节变化不同站点均呈现不同变化特征，昌马堡站夏季降水量的增加对降水量增加贡献最大，而潘家庄站和双塔堡水库站均为秋季降水量的增加对降水量增加贡献最大，同时不同季节不同年代平均降水距平呈现不同变化特征。

3.5　降水突变特征

3.5.1　昌马堡站　从图 7a 可知，全年昌马堡站降水在 20 世纪 50 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 均为正值，平均降水呈现增加趋势，特别是 20 世纪 60 年代后期至 80 年代后期和 21 世纪 01 年代，降水增加趋势超过 95% 临界线（$U_{0.05}=1.96$），甚至超过 99% 显著性水平（$U_{0.01}=2.56$），表明昌马堡站平均降水在这一时段上升趋势十分显著。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1964 年和 2001 年，且交点在 ±1.96 临界线之间，说明昌马堡站平均降水在 1964 年和 2001 年发生突变，1964 年和 2001 年为突变点，因此，昌马堡站平均降水划分为 1956—1964 年、1965—2001 年和 2002—2016 年 3 个时段。

从图 7b 可知，昌马堡站春季降水在 20 世纪 60 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 为正值，平均降水呈现增加趋势，特别是 21 世纪 00 年代后期至 10 年代，降水增加趋势超过 95% 临界线（$U_{0.05}=1.96$），表明

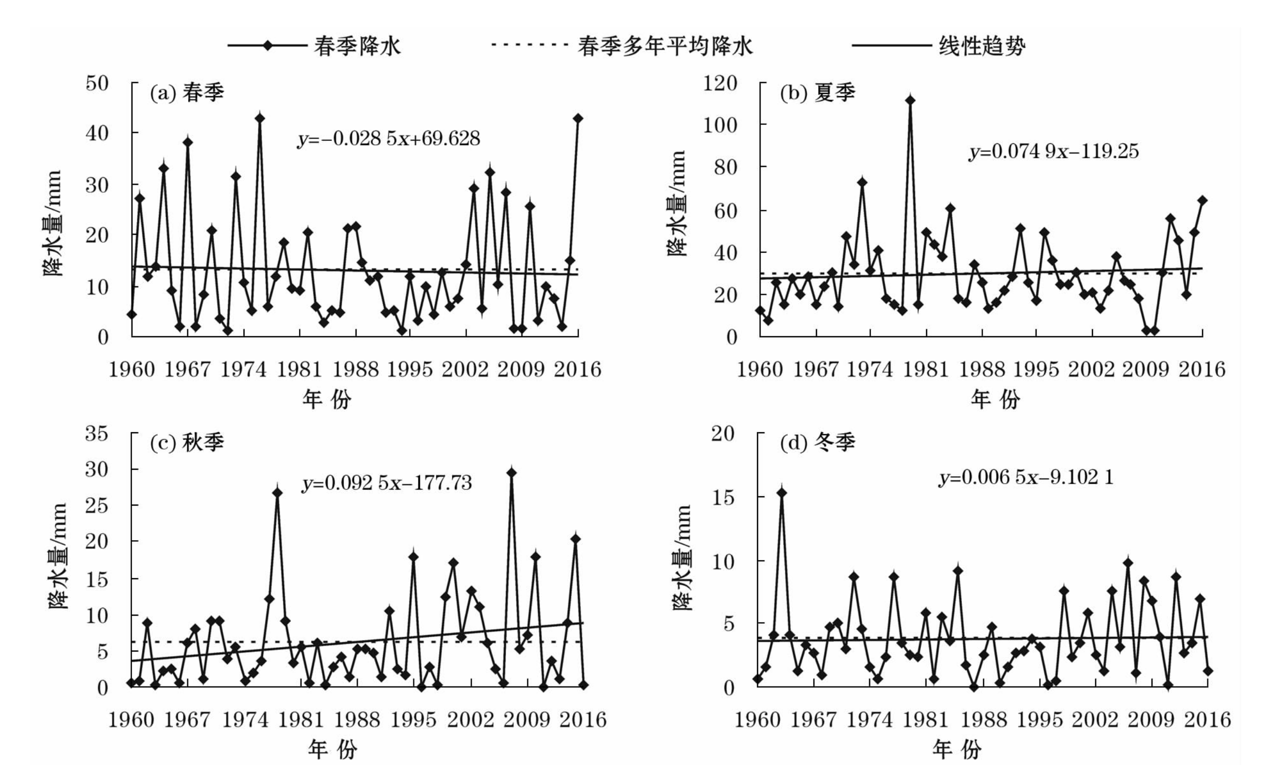


图 6　双塔堡水库站降水量季节变化

Fig. 6　Seasonal change of precipitation in Shuangtabao Reservoir Station

昌马堡站春季平均降水在这一时段上升趋势十分显著。UF_k 和 UB_k 相交于 1980 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明昌马堡站春季平均降水在 1980 年发生突变,1980 年为突变点,因此,昌马堡站春季平均降水划分为 1956—1980 年和 1981—2016 年 2 个时段。

从图 7c 可知,昌马堡站夏季降水在 20 世纪 50 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 均为正值,平均降水呈现增加趋势,特别是 20 世纪 70 年代中期至 80 年代后期,降水增加趋势超过 95% 临界线($U_{0.05}$ = 1.96),表明昌马堡站夏季平均降水在这一时段上升趋势十分显著。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1962 年、2007 年和 2011 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明昌马堡站夏季平均降水在 1962 年、2007 年和 2011 年发生突变,1962 年、2007 年和 2011 年为突变点,因此,昌马堡站夏季平均降水划分为 1956—1962 年、1963—2007 年、2008—2011 年和 2012—2016 年 4 个时段。

从图 7d 可知,秋季昌马堡站降水在 20 世纪 50 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 均为正值,平均降水呈现增加趋势。UF_k 和 UB_k 交点相对比较多,主要突变点在 1960 年和 1998 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明昌马堡站秋季平均降水在 1960 年和 1998 年发生突变,1960 年和 1998 年为突变点,因此,昌马堡站秋季平均降水划分为 1956—1960 年、1961—1998 年和 1999—2016 年 3 个时段。

从图 7e 可知,昌马堡站冬季降水在 20 世纪 50 年代后期至 60 年代后期 UF_k 为负值,之后转变成正值至 70 年代中期后又转变成负值至 70 年代末,说明在冬季降水量呈现先减后增再减的变化趋势;从 80 年代至 10 年代 UF_k 为正值,平均降水呈现增加趋势。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1966 年和 1976 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明昌马堡站冬季平均降水在 1966 年和 1976 年发生突变,1966 年和 1976 年为突变点,因此,昌马堡站冬季平均降水划分为1956—1966年、1967—1976年和1977—

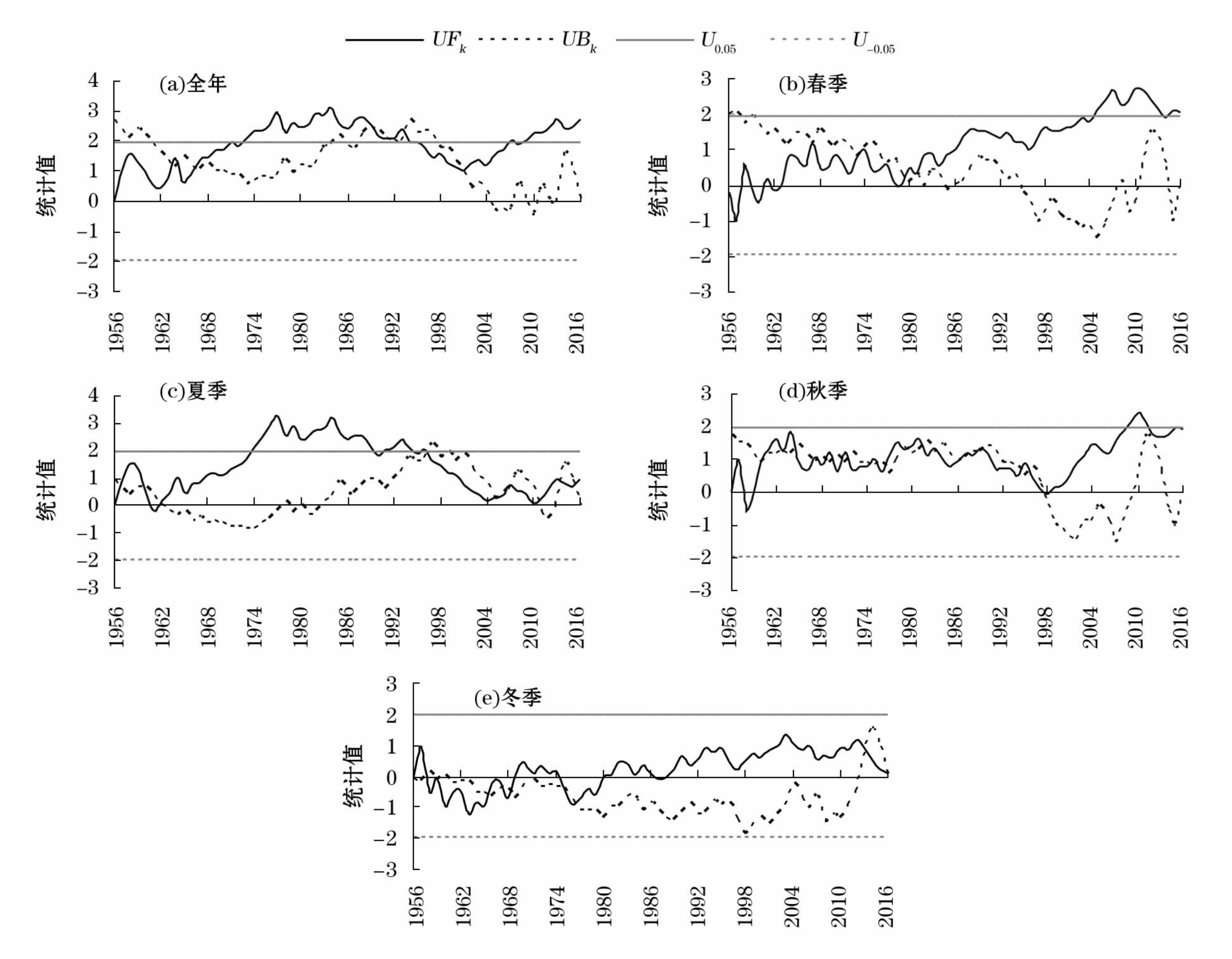


图 7　1956—2016 年昌马堡站年和四季平均降水突变检验

Fig. 7　Seasonal average and annual precipitation M-K mutation test in Changmabao in 1956 – 2016

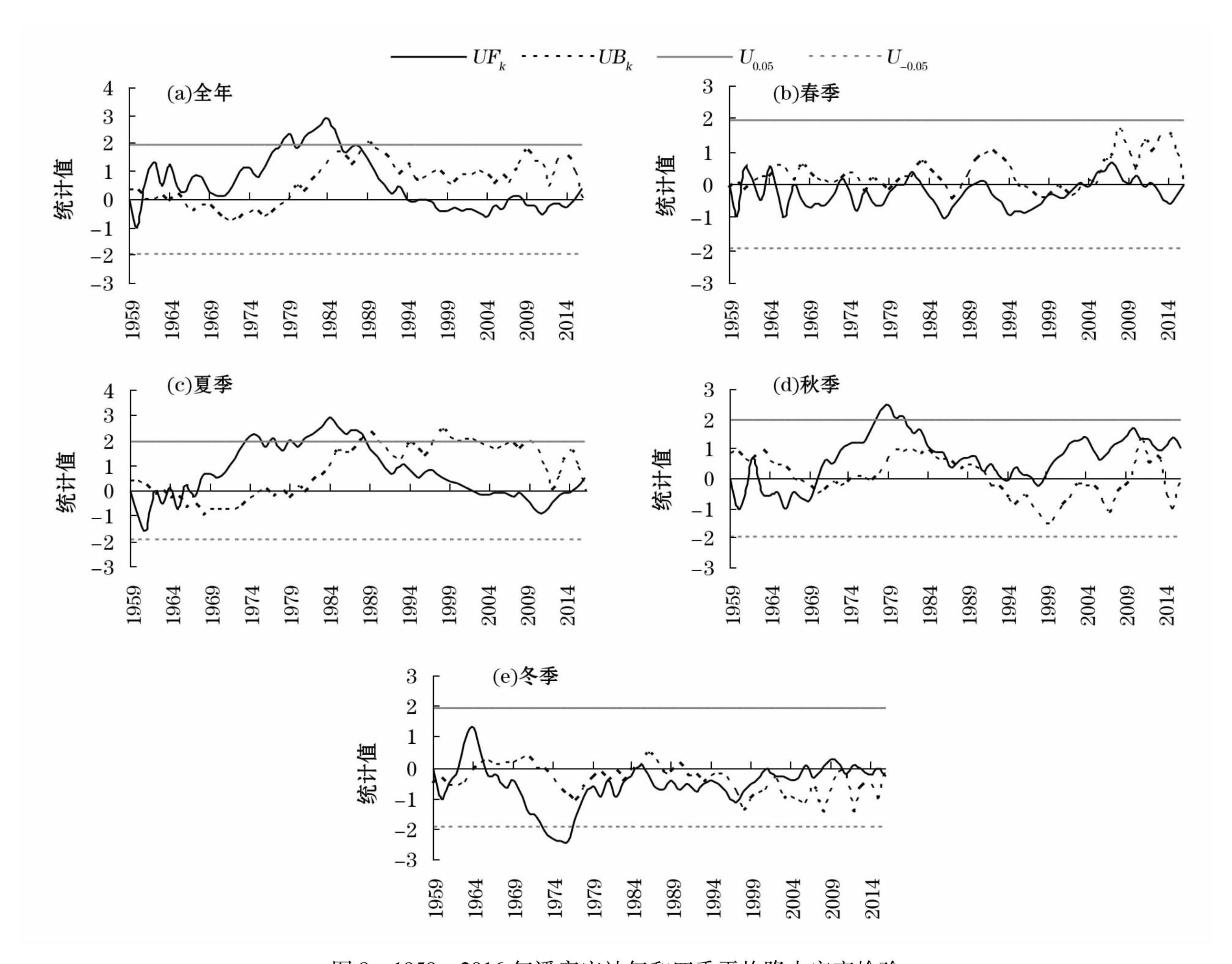


图 8　1959—2016 年潘家庄站年和四季平均降水突变检验

Fig. 8　Seasonal average and annual precipitation M-K mutation test in Panjiazhuang in 1959 – 2016

2016 年 3 个时段。

3.5.2　潘家庄站　从图 8a 可知,全年潘家庄站降水在 20 世纪 50—90 年代中期 UF_k 为正值,平均降水呈现增加趋势;之后 UF_k 由正值转变为负值,并在 0 附近波动,年平均降水处于略微下降趋势。UF_k 和 UB_k 相交于 1988 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明潘家庄站平均降水在 1988 年发生突变,1988 年为突变点,因此,潘家庄站平均降水划分为 1959—1988 年和 1989—2016 年 2 个时段。

从图 8b 可知,潘家庄站春季降水在 20 世纪 60 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 值在 0 附近上下波动,平均降水呈现增加—降低—增加的波动变化。UF_k 和 UB_k 相交点比较多,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明潘家庄站春季平均降水突变相对复杂。

从图 8c 可知,夏季潘家庄站降水在 20 世纪 60 年代初至中期 UF_k 为负值,平均降水呈现下降趋势;之后 UF_k 由负值转变为正值并逐渐增大,至 80 年代中期又逐渐减小,表明这一时段年平均降水处于先上升后下降的变化趋势,特别是 80 年代,增加趋势超过 95% 临界线($U_{0.05}=1.96$);21 世纪 00 年代初至 10 年代中期 UF_k 为负值,表明降水呈现下降趋势。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1965 年,且交点在 ±1.96临界线之间,说明潘家庄站夏季平均降水在 1965 年发生突变,1965 年为突变点,因此,潘家庄站夏季平均降水划分为 1959—1965 年和 1966—2016 年 2 个时段。

从图 8d 可知,潘家庄站秋季降水在 20 世纪 60 年代 UF_k 为负值,平均降水呈现下降趋势;70 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 为正值,年平均降水处于上升趋势。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1969 年、1988 年和 2011 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明潘家庄站秋季平均降水在 1969 年、1988 年和 2011 年发生突变,1969 年、1988 年和 2011 年为突变点,因此,潘家庄站秋季平均降水划分为 1959—1969 年、1970—1988 年、1989—2011 年和 2012—2016 年 4 个时段。

从图 8e 可知,潘家庄站冬季降水在 20 世纪 60 年代中期至 10 年代 UF_k 呈现负值,说明平均降水呈现下降趋势,特别 1972—1977 年降水减小趋势超过 95% 临界线($U_{0.05}=1.96$),表明潘家庄站冬季平均降水在这一时段下降趋势十分显著。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1966 年、1985 年、1997 年和 2011 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明潘家庄站冬季平均降水在 1966 年、1985 年、1997 年和 2011 年发生突变,1966 年、1985 年、1997 年和 2011 年为突变点,因此,潘家庄站冬季平均降水划分为 1959—1966 年、1967—1985 年、1986—1997 年、1998—2011 年和 2012—2016 年 5 个时段。

3.5.3　双塔堡水库站　从图 9a 可知,双塔堡水库站全年降水在 20 世纪 60 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 为正值,平均降水呈现增加趋势,特别是 70—80 年代中期增加趋势比较显著。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1987 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明双塔堡水库站平均降水在 1987 年发生突变,1987 年为突变点,因此,双塔堡水库站平均降水划分为 1960—1987 年和 1988—2016 年 2 个时段。

从图 9b 可知,双塔堡水库站春季降水在 20 世纪 60 年代初至中期 UF_k 为正值,平均降水呈现增加趋势;之后 UF_k 由正值转变为负值,并呈现波动趋势靠近 0 附件,说明年平均降水处于波动下降趋势。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1970 年和 2003 年,且交点在 ±1.96 临界线之间,说明双塔堡水库站春季平均降水在 1970 年和 2001 年发生突变,1970 年和 2001 年为突变点,因此,双塔堡水库站春季平均降水划分为 1960—1970 年、1971—2001 年和 2002—2016 年 3 个时段。

从图 9c 可知,双塔堡水库站夏季降水在 20 世纪 60 年代中期至 21 世纪 10 年代 UF_k 为正值,平均降水呈下降趋势,特别是 1971—1977 年,降水增加趋势超过 95% 临界线。UF_k 和 UB_k 主要相交于

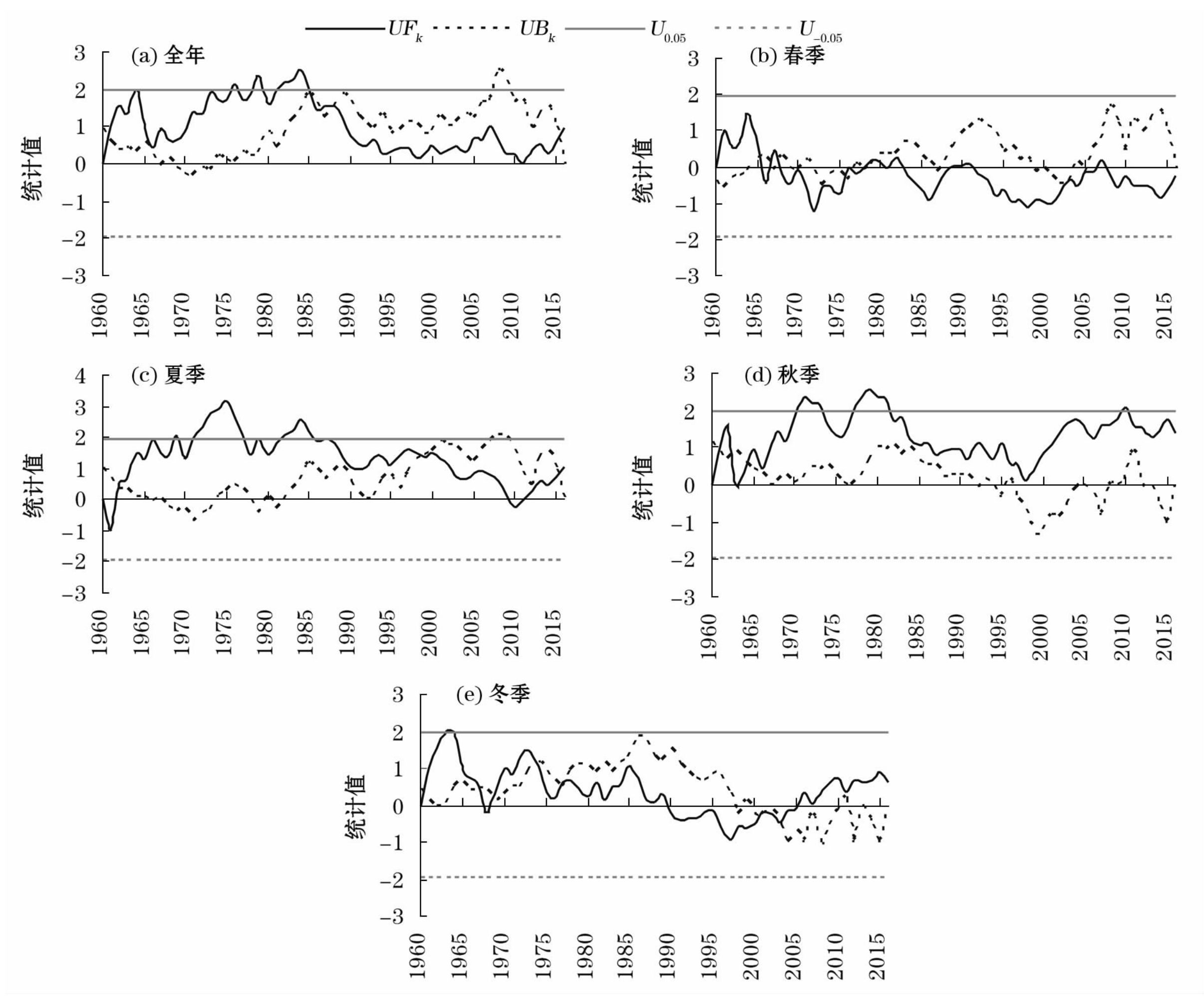


图 9　1960—2016 年双塔堡水库站年和四季平均降水突变检验

Fig. 9　Seasonal average and annual precipitation M-K mutation test in Shuangtabao Reservoir in 1960 - 2016

1962 年和 1999 年，且交点在 ±1.96 临界线之间，说明双塔堡水库站夏季平均降水在 1962 年和 1999 年发生突变，1962 年和 1999 年为突变点，因此，双塔堡水库站夏季平均降水划分为 1960—1962 年、1963—1999 年和 2000—2016 年 3 个时段。

从图 9d 可知，双塔堡水库站秋季降水在 20 世纪 60 年代至 21 世纪 10 年代 UF_k 均为正值，说明平均降水呈现上升趋势，70—80 年代初和 00 年代中期至 10 年代上升比较明显。UF_k 和 UB_k 主要相交于 1965 年，且交点在 ±1.96 临界线之间，说明双塔堡水库站秋季平均降水在 1965 年发生突变，1965 年为突变点，因此，双塔堡水库站秋季平均降水划分为 1960—1965 年和 1966—2016 年 2 个时段。

从图 9e 可知，双塔堡水库站冬季降水在 20 世纪 60—80 年代 UF_k 为正值，说明平均降水呈现上升趋势；90 年代至 21 世纪 00 年代中期 UF_k 为负值，平均降水呈现在下降趋势；之后 UF_k 由负值转变为正值，并逐渐增大，年平均降水处于上升趋势。UF_k 和 UB_k 相交于 1967 年、1974 年和 2002 年，且交点在 ±1.96 临界线之间，说明双塔堡水库站冬季平均降水在 1967 年、1974 年和 2002 年发生突变，1967 年、1974 年和 2002 年为突变点，因此，双塔堡水库站冬季平均降水划分为 1960—1967 年、1968—1974 年、1975—2002 年和 2003—2016 年 4 个时段。

4 结论与讨论

疏勒河流域干流昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站多年平均降水量分别为 95.77 mm、51.39 mm 和 52.52 mm，年均降水量分别以 5.47 mm·$(10a)^{-1}$、0.866 mm·$(10a)^{-1}$ 和 1.454 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加，61 a、58 a 和 57 a 内分别增加了 33.37 mm、5.02 mm 和 8.29 mm。总体上，疏勒河干流年降水量呈现不同程度的增加趋势，降水量均呈现不同时段升降变化过程。

疏勒河干流降水量年内分配极不均匀，降水量主要集中于 5—8 月，占年降水量的 65% 以上。

昌马堡站 20 世纪 50—60 年代和 90 年代降水量相对较低，70—80 年代和 21 世纪 00—10 年代降水量相对较高；潘家庄站 60 年代、90—00 年代降水量相对较低，70—80 年代和 21 世纪 10 年代降水量相对较高；双塔堡水库站 60、80—21 世纪 00 年代降水量相对较低，70 年代和 21 世纪 10 年代降水量相对较高。总体上，疏勒河干流降水量年代际呈现 60 年代和 90 年代降水量均低于多年平均值，70 年代和 10 年代降水量均高于多年平均值。

昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站分别呈现夏季、秋季和秋季降水量增加对该站降水量增加贡献最大。总体上，疏勒河干流降水量季节变化不同站点均呈现不同变化特征，同时不同季节不同年代平均降水距平呈现不同变化特征。

通过 M-K 法检测结果显示，疏勒河流域干流昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站年平均和不同季节降水量呈现不同变化趋势，表现不同程度突变，呈现不同时间突变点。昌马堡站、潘家庄站和双塔堡水库站年平均降水量突变点分别为 1964 年和 2001 年、1988 年和 1987 年。

本研究从疏勒河干流降水量年变化、年内变化、年际变化、季节变化和突变特征等方面进行了系统分析，研究序列相对较长，以往研究集中于流域降水空间分布规律、降水水汽来源等方面[22-27]，而对流域干流降水变化特征研究相对较少。3 个站年平均降水量呈现不同程度突变和不同时间突变点，这与研究时间序列、气候因素和人类活动有很大关系，昌马堡站位于出山口，受人类活动影响相对较少，气候因素成为关键影响因素；而潘家庄站和双塔堡水库站受人类活动和气候因素双重影响。由于干旱内陆河流域气候特点的复杂性，降水受多种因素综合影响，其变化特征时空差异很大，因此，在后续研究中应进一步加强环境变化下区域降水变化特征与预测研究。

参考文献（References）：

[1] 何庆龙，周维博，夏伟，等. 延安市近 60 年降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报，2018，29(1)：31-37. [He Qinglong，Zhou Weibo，Xia Wei，et al. Spatial-temporal characteristics about precipitation of Yan'an City in the past 60 years[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2018，29(1)：31-37.]

[2] 王小军，贺瑞敏，尚熳廷. 榆林市降水时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境，2011，25(5)：103-108. [Wang Xiaojun，He Ruimin，Shang Manting. Evolution law of precipitation in Yulin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2011，25(5)：103-108.]

[3] 吴凯，王晓琳，王高旭，等. 1961—2014 年西辽河流域降水时空变异性诊断[J]. 南水北调与水利科技，2017，15(2)：22-28. [Wu Kai，Wang Xiaolin，Wang Gaoxu，et al. Spatial-temporal vari-

ation of precipitation in West Liao River Basin during 1961 – 2014 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(2):22 – 28.]

[4] 王晖,隆霄,马旭林,等. 近 50a 中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究,2013,30(4):712 – 718. [Wang Hui,Long Xiao,Ma Xulin,et al. Precipitation in the eastern part of northwest China in recent 50 years[J]. Arid Zone Research,2013,30(4):712 – 718.]

[5] 刘玉斌,韩美,倪娟. 东营市近 46 年降水变化特征分析[J]. 科技通报,2017,33(2):18 – 23. [Liu Yubin,Han Mei,Ni Juan. Analysis of change characteristics of precipitation in recent 46 years in Dongying[J]. Bulletin of Science and Technology,2017,33(2):18 – 23.]

[6] 宋扬,周维博,马亚鑫,等. 50 年来灞河流域降水变化特征分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(7):12 – 18. [Song Yang,Zhou Weibo,Ma Yaxin,et al. Characteristics of precipitation variation of Bahe River Basin in the past 50 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2017,34(7):12 – 18.]

[7] 冶运涛,梁犁丽,龚家国,等. 长江上游流域降水结构时空演变特性[J]. 水科学进展,2014,25(2):164 – 171. [Ye Yuntao,Liang Lili,Gong Jiaguo,et al. Spatial-temporal variability characteristics of precipitation structure across the upper Yangtze River basin,China[J]. Advances in Water Science,2014,25(2):164 – 171.]

[8] 马建琴,和鹏飞. 1951—2013 年周口地区降水时空变化特征研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(2):20 – 24. [Ma Jianqin,He Pengfei. Temporal and spatial distribution of precipitation in Zhoukou area from 1951 to 2013[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2017,38(2):20 – 24.]

[9] 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报,2014,69(5):661 – 671. [Dong Xuguang,Gu Weizong,Meng Xiangxin,et al. Change features of precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(5):661 – 671.]

[10] 吴亚楠,李鸿雁,王玉新. 第二松花江流域近 75 年降水量变化特征分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(4):2257 – 2259. [Wu Yanan,Li Hongyan,Wang Yuxin. Characteristics analysis of 75 – years precipitation change in the second Songhua River Basin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(4):2257 – 2259.]

[11] 郑新倩,李新建,杨帆,等. 1961—2010 年乌鲁木齐降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(11):178 – 184. [Zheng Xinqian,Li Xinjian,Yang Fan,et al. Changing features of precipitation in Urumqi during 1961 – 2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2014,28(11):178 – 184.]

[12] 白淑英,莫婷,史建桥,等. 近 50 年贵州不同强度降水日数时空变化分析[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):220 – 224. [Bai Shuying,Mo Ting,Shi Jianqiao,et al. Spatial and temporal variations of rainfall days with different intensities in Guizhou in recent 50 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(2):220 – 224.]

[13] 韩熠哲,马伟强,王炳赟,等. 青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J]. 高原气象,2017,36(6):1477 – 1486. [Han Yizhe,Ma Weiqiang,Wang Bingyun,et al. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013[J]. Plateau Meteorology,2017,36(6):1477 – 1486.]

[14] 李玲萍,刘维成,张宇林,等. 石羊河流域主汛期降水日变化特征[J]. 中国沙漠,2015,35(5):1291 – 1300. [Li Lingping,Liu Weicheng,Zhang Yulin,et al. Diurnal variation of precipitation in flood season over the Shiyanghe River Basin[J]. Journal of Desert Research,2015,35(5):1291 – 1300.]

[15] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519 – 531. [He Wei,Bu Rencang,Xiong Zaiping,et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(2):519 – 531.]

[16] 陈祥义,肖文发,黄志霖,等. 1951—2012 年三峡库区降水时空变化研究[J]. 生态环境学报,2015,24(8):1310 – 1315. [Chen Xiangyi,Xiao Wenfa,Huang Zhilin,et al. Spatiotemporal distribution of precipitation in Three Gorges Reservoir Area(TGRA) during 1951 – 2012[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(8):1310 – 1315.]

[17] 马佳宁,高艳红. 近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J]. 高原气象,2019,38(1):124 – 135. [Ma Jianing,Gao Yanhong. Analysis of annual precipitation and extreme precipitation change in the upper Yellow River Basin in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology,2019,38(1):124 – 135.]

[18] 李虹雨,马龙,刘廷玺,等. 1951—2014 年内蒙古地区气温、降水变化及其关系[J]. 冰川冻土,2017,39(5):1098 – 1112. [Li Hongyu,Ma Long,Liu Tingxi,et al. Change and relationship of temperature and precipitation in Inner Mongolia during 1951 – 2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(5):1098 – 1112.]

[19] 虞海燕,刘树华,赵娜,等. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报,2011,27(4):1 – 11. [Yu Haiyang,Liu Shuhua,Zhao Na,et al. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009[J]. Journal of Meteorology and Environment,2011,27(4):1 – 11.]

[20] 张一驰,吴凯,于静洁,等. 华北地区 1951—2009 年气温、降水变化特征[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1930 – 1941. [Zhang Yichi,Wu Kai,Yu Jingjie,et al. Characteristics of precipitation and air temperature variation during 1951 – 2009 in North China[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(11):1930 – 1941.]

[21] 刘括,高晓清,谭桂荣,等. 中国江淮地区夏季强降水事件的统计分析[J]. 高原气象,2019,38(1):136 – 142. [Liu Kuo,Gao Xiaoqing,Tan Guirong,et al. Statistical analysis of summer heavy rainfall events over Jianghuai Region of China[J]. Plateau Meteorology,2019,38(1):136 – 142.]

[22] 常继青,牛最荣. 甘肃黄河流域与疏勒河流域降水径流变化特

性对比分析[J]. 水文,2014,34(5):94－96. [Chang Jiqing, Niiu Zuirong. Comparative analysis of precipitation and runoff change characteristics between Yellow River and Shulehe River in Gansu Province[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(5):94－96.]

[23] 张丽. 疏勒河流域降水分布规律及变化趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术,2015,51(7):1－4,21. [Zhang Li. Analysis of precipitation distribution and change trend in Shule River Basin[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2015, 51(7):1－4,21.]

[24] 宋阁庆,李计生,王若臣. 近50年疏勒河流域降水空间分布规律研究[J]. 地下水,2016,38(1):104－106. [Song Geqing, Li Jisheng, Wang Ruocheng. Study on spatial distribution of precipitation of Shule River Basin in past 50 years[J]. Ground Water, 2016,38(1):104－106.]

[25] 李清峰,杨国靖,赵传成. 疏勒河上游高寒草地生长季降水特征[J]. 生态学杂志,2016,35(7):1776－1782. [Li Qingfeng, Yang Guojing, Zhao Chuancheng. Precipitation characteristics in alpine grassland in the upper reaches of Shule River during growing season[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1776－1782.]

[26] 余波,赵玮. 疏勒河流域降水水化学分布与组合特征研究[J]. 甘肃水利水电技术,2017,53(3):4－6,10. [Yu Bo, Zhao Wei. Study on the distribution and combination characteristics of precipitation hydrochemistry in Shule River Basin[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology,2017,53(3):4－6,10.]

[27] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州:兰州大学,2017. [Zhao Wei. Study on the Isotopes and Moisture Source in Precipitation in the Shule River Basin[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2017.]

[28] 刘普幸,张克新,霍华丽,等. 疏勒河中下游绿洲胡杨林土壤水盐的空间变化特征与成因[J]. 自然资源学报,2012,27(6):942－952. [Liu Puxing, Zhang Kexin, Huo Huali, et al. Characteristics and causes of the spatial variations of soil water and salt content under *Populus euphratica* Oliv. in the middle and lower reaches of the Shule river basin[J]. Journal of Natural Resources, 2012,27(6):942－952.]

[29] 李培都,司建华,冯起,等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2018,34(2):52－60. [Li Peidu, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):52－60.]

[30] 商沙沙,廉丽姝,马婷,等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(1):68－76. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research,2018,35(1):68－76.]

[31] 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘巍. 艾比湖流域1957—2013年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析[J]. 冰川冻土,2016,38(1):69－76. [Reziwanguli Maimaitiyiming, Yang Jianjun, Liu Wei. Changing characteristics of potential evapotranspiration, air temperature and precipitation in Ebinur Lake basin from 1957 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(1):69－76.]

[32] 周唤唤,郭威. 芜湖市1971—2015年降水变化趋势及突变性分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2018,30(1):5－10. [Zhou Huanhuan, Guo Wei. Rainfall change trend and mutation analysis in Wuhu from 1971 to 2015[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute,2018,30(1):5－10.]

[33] 常周梅,胡文博,张丽娟. 西宁市1951—2015年气温及降水量变化特征[J]. 水电能源科学,2017,35(2):7－11. [Chang Zhoumei, Hu Wenbo, Zhang Lijuan. Change characteristics of temperature and precipitation from 1951 to 2015 in Xining City[J]. Water Resources and Power,2017,35(2):7－11.]

[34] 刘艳伟,王淑莹,屠星磊,等. 元谋干热河谷区近60年干湿状况和气温变化特征分析[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(2):172－178. [Liu Yanwei, Wang Shuying, Tu Xinglei, et al. Characteristic analysis of dry-wet condition and temperature trend in Yuanmou dry-hot valley(DHV) in recent 60 years[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(2):172－178.]

[35] 高彦春,王金凤,封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学报,2017,25(4):467－477. [Gao Yanchun, Wang Jinfeng, Feng Zhiming. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(4):467－477.]

Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River

SUN Dong-yuan[1,2], QI Guang-ping[1], YAN Ji-xuan[1], AN Peng-cun[1]

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;

2. *Gansu Research Institute for Water Conservancy*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

Abstract: As the third largest inland river basin in the Hexi corridor, Gansu province, northwest China, the Shule River Basin poses as an important ecological security barrier. As the main zone of societal, economic, and human activity, the mainstream of the Shule River is also a vital ecological defense at the forefront of the Shule River Basin. The purpose of this study was to analyze the precipitation variation in the mainstream of the Shule River Basin and to elucidate the precipitation trends in the river basin. Monthly and annual precipitation data from Changmabao, Panjiazhuang, and Shuangtaobao Reservoir hydrological stations along the mainstream of the Shule River were used. Variations in yearly annual change, change during a year, interannual change, seasonal change, and precipitation mutation in the mainstream of the Shule River from 1956 to 2016 were analyzed using linear tendency, cumulative anomaly, moving average, and Mann-Kendall mutation tests. The results showed that the annual precipitation in the main stream of the Shule River exhibited an overall increasing trend (to varying degrees), following the order: Changmabao, 5.47 mm · $(10a)^{-1}$ > Shuangtaobao Reservoir 1.454 mm · $(10a)^{-1}$ > Panjiazhuang 0.866 mm · $(10a)^{-1}$. The distribution of precipitation during a year was extremely uneven; however, it was mainly concentrated in May-August, accounting for more than 65% of the annual precipitation. The interannual change in precipitation in the 1960s and 1980s was lower than the average annual precipitation; whereas in the 1970s and 2010s, it was higher than the annual average. The seasonal variation in precipitation showed different characteristics at different stations. Precipitation at Changmabao, Panjiazhuang, and Shuangtabao Reservoir contributed the most toward the precipitation in summer, autumn and autumn, respectively. The average precipitation anomaly in different seasons and different years presented different characteristics. The precipitation mutation of the annual average and over the different seasons showed different mutation characteristics and different mutation times. The mutation points of the average annual precipitation in Changmabao, Panjiazhuang, and Shuangtabao Reservoir occurred in 1964 and 2001, 1988, and 1987, respectively. These research results are practically important in terms of promoting regional integrated water resources management and scientific allocation. In a follow-up study, the characteristics and prediction of regional precipitation trends under a changing environment will be further investigated.

Key words: mainstream of Shule River; precipitation; variation characteristics; Mann-Kendall mutation test; Gansu